

# Transport properties and local imaging of graphene quantum dots

**Doctoral Thesis****Author(s):**

Schnez, Stephan

**Publication date:**

2010

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006318658>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH No. 19318

# Transport Properties and Local Imaging of Graphene Quantum Dots

A dissertation submitted to

**ETH ZÜRICH**

for the degree of  
Doctor of Sciences (Dr. sc. ETH Zürich)

presented by

**STEPHAN SCHNEZ**

Diplomphysiker, Universität Heidelberg  
born October 30, 1980  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Klaus Ensslin, examiner  
Prof. Dr. Manfred Sigrist, co-examiner  
Prof. Dr. Thomas Ihn, co-examiner

October 2010

# Abstract

In this thesis, we present transport and scanning-gate microscopy experiments on graphene nanostructures at cryogenic temperatures. Moreover, an analytic expression for the quantum states of a circular graphene quantum dot in a perpendicular magnetic field is derived.

Graphene is a semi-metal showing the electric field effect and thus is an interesting material for the mesoscopic semiconductor community. In graphene quantum dots, we observed clear indications of transport through confinement-induced excited states. These showed up in resonant sequential tunneling and in inelastic co-tunneling in the Coulomb-blockaded regime using tunneling spectroscopy. To deepen our understanding of the confining potential, we looked at the magnetic-field dependence and identified a transition from confinement-induced to magnetic-field induced behavior.

Motivated by these experimental results, we could derive an analytic mathematical expression which qualitatively describes both the confinement-induced and the magnetic-field induced effects as well as the transition between both. As a side-effect, a strategy for determining experimentally the electron-hole crossover in graphene quantum dots was developed.

A second graphene quantum dot was studied with our dilution refrigerator scanning-gate microscope. We could clearly resolve Coulomb resonances of the quantum dot. More than 35 Coulomb resonances were recorded in some measurements where a spacing of around 20 nm of adjacent Coulomb resonances could clearly be resolved. This proved the exceptional quality of both the sample and the scanning sensor. Our measurements also gave direct proof of the existence of localized states in graphene nanostructures: We could image and locate a single localized puddle in each constriction connecting the quantum dot to source and drain. Furthermore, our technique enabled us to deduce a radius of around 10 to 13 nm for such a localized state. Despite the good spatial resolution, we could not resolve quantum confinement effects in the quantum dot or in one of the localized puddles.

Finally, we analyzed experimentally how a change in the electrostatic environment can influence the outcome of a scanning-gate measurement. We identified

the possible underlying processes and supported our arguments with numerical simulations.

As a basis for future scanning-tunneling experiments on graphene, a description of the feedback loop in linear response including bandwidth and response function was established. A comparison with the measured response showed good agreement.

# Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit präsentieren wir Transportmessungen und Scanning-Gate-Experimente an Graphennanostrukturen und bei Temperaturen unter 4.2 K. Zudem wird ein analytischer Ausdruck für die Quantenzustände eines runden Graphenquantenpunkts in einem senkrechten Magnetfeld hergeleitet.

Graphen ist ein Halbmetall, welches den elektrischen Feldeffekt aufweist. Dies macht es für die mesoskopische Halbleiterforschung interessant. In Graphenquantenpunkten haben wir eindeutige Anzeichen von Ladungstransport durch angeregte Zustände gefunden. Diese zeichnen sich durch eine erhöhte Leitfähigkeit für Transportprozesse erster Ordnung und für Prozesse zweiter Ordnung im klassisch verbotenen Regime, sogenanntes inelastische Ko-Tunneln, aus. Um das Einschlusspotential besser zu verstehen, haben wir das Verhalten im senkrechten Magnetfeld untersucht. Wir haben einen Übergang von Einschlusspotential-dominierten zu Magnetfeld-dominierten Verhalten identifizieren können.

Diese experimentellen Resultate waren Motivation, einen analytischen mathematischen Ausdruck abzuleiten, der die Effekte, die durch sowohl das Einschlusspotential als auch das Magnetfeld sowie deren Übergang hervorgerufen werden, qualitativ beschreibt. Nebenbei ergab sich daraus auch eine Strategie, wie der Elektron-Loch-Übergang in Graphenquantenpunkten experimentell bestimmt werden kann.

Mit unserem Mischkryostaten Scanning-Gate-Mikroskop untersuchten wir einen zweiten Graphenquantenpunkt. Die Coulombresonanzen des Quantenpunkts konnten wir örtlich auflösen. Mehr als 35 von ihnen mit einem Abstand von teilweise unter 20 nm wurden in einigen Messungen aufgenommen. Dies bewies die ausgezeichnete Qualität sowohl der Probe als auch des Sensors. Unsere Messungen bewiesen auch die Existenz lokalisierter Zustände in Graphennanostrukturen: Wir konnten jeweils einen lokalisierten Zustand in jeder Tunnelbarriere, die den Quantenpunkt mit den Kontakten verbindet, messen und lokalisieren. Zudem ermöglichte uns unsere Technik, einen Radius von ca. 10 bis 13 nm für die lokalisierten Zustände abzuleiten. Trotz der guten räumlichen Auflösung konnten wir Effekte, die durch das Einschlusspotential hervorgerufen wurden, in dem Quantenpunkt oder in einem der lokalisierten Zustände nicht nachweisen.

Abschliessend analysierten wir experimentell, wie eine Änderung in der elek-

trostatischen Umgebung das Resultat einer Scanning-Gate-Messung beeinflussen kann. Wir identifizierten die möglichen zugrundeliegenden Prozesse. Numerische Simulationen unterstützten unsere Argumentation.

Die Antwortfunktion des Regelkreises für den Betrieb des Aufbaus im Raster-tunnelmodus für potentielle Rastertunnelexperimente auf Graphen wurde in linearer Antworttheorie hergeleitet. Der Vergleich mit der gemessenen Antwortfunktion zeigte eine gute Übereinstimmung.